

MEDIDAS DE PROPIEDADES DIELÉCTRICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MEDIANTE ELIPSOMETRÍA

J. M. Rodríguez⁽¹⁾, A. Benito⁽¹⁾, V. González⁽¹⁾, A. Parra⁽¹⁾, C. Rueda⁽¹⁾, I. Gómez⁽¹⁾, J. E. González⁽¹⁾ y J. L. Jiménez⁽¹⁾

jmrodri@diac.upm.es, antonio.benito.arranz@alumnos.upm.es, vgonzalz@diac.upm.es, aparra@diac.upm.es,
rueda@diac.upm.es, igomez@diac.upm.es, jegonzal@diac.upm.es, jljimene@diac.upm.es

⁽¹⁾ Dpto. de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones. EUIT de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid. Carretera de Valencia, km. 7 28031 Madrid.

Abstract- A set of measurements of electromagnetic properties of building materials is presented in this work. The method is based on the measurement of the polarization state of the reflected signal from the material under study at a fixed angle of incidence. From the measured data, by using the Fresnel equations, it has been obtained the dielectric constant. Measurements were done by using two horn antennas at the frequency of 9 GHz. The obtained results are compared with the free space reflexion and transmission Fresnel method and other reflection methods based on a conductor waveguide. The method explained in this work can be used for other type of materials and its main advantage is the non-destructive character and the ease implementation.

I. INTRODUCCIÓN

La caracterización dieléctrica de materiales en radiofrecuencia ha sido desarrollada ampliamente en los últimos tiempos. En concreto, para el modelado de los fenómenos asociados con la propagación radioeléctrica, es importante ser capaz de predecir la atenuación y reflexión que los rayos sufren debido a la presencia de edificios y de otros obstáculos. Por tanto, resulta de interés determinar los valores de la permitividad relativa de los materiales de construcción que se utilizan tanto en entornos interiores como exteriores.

Se puede encontrar en la literatura una amplia variedad de métodos para determinar las propiedades dieléctricas de los materiales [1]. Dentro de estos métodos, presentan un gran interés los llamados métodos no resonantes que incluyen principalmente los basados en técnicas de transmisión o reflexión, cuyas principales ventajas residen en el hecho de ser técnicas no destructivas y permitir su implementación en un amplio rango de frecuencias. Más concretamente, existe una gran variedad de métodos basados en medidas en el espacio libre, dependiendo del tipo de magnitud medida (escalar o vectorial), y del tipo de configuración empleada (reflexión o transmisión; ángulo de incidencia fijo o variable). Los métodos basados en medidas en el espacio libre presentan como gran ventaja la forma relativamente sencilla de obtener las propiedades dieléctricas del material bajo estudio a partir de los datos experimentales

[2,3]. Sin embargo, hay que tener en cuenta una serie de factores que pueden dificultar la obtención de buenos resultados experimentales: las medidas deben ser realizadas en una cámara anecoica, se debe disponer de antenas muy directivas y se debe minimizar los efectos debidos a la presencia de reflexiones indeseadas y a los fenómenos de difracción en los bordes.

El principio básico de los métodos basados en medidas en el espacio libre reside en que a partir del conocimiento de la permitividad eléctrica de un material, usando las ecuaciones de Fresnel, se puede: calcular los coeficientes de reflexión y transmisión para un arbitrario ángulo de incidencia y para diferentes estados de polarización de la señal que incide sobre el material (método de Fresnel), o bien determinar el estado de polarización de la señal reflejada (método elipsométrico). De forma inversa, la permitividad eléctrica del material puede deducirse a partir de la medida de la señal reflejada o transmitida por la muestra o bien del conocimiento de dicho estado de polarización

En este trabajo presentamos la obtención de la permitividad eléctrica utilizando el método elipsométrico y los resultados son comparados con los obtenidos con el método de Fresnel en transmisión y reflexión así como con métodos basados en la utilización de guías conductoras.

II. ASPECTOS TEÓRICOS

El método basado en la elipsometría ha sido ampliamente utilizado a frecuencias ópticas [4], y más recientemente ha sido adaptado a frecuencias de microondas [2,3]

La elipsometría es una técnica basada en la medida del cambio del estado de polarización de la onda incidente tras producirse la reflexión en la interfaz aire-material, para un determinado ángulo de incidencia. Debido a la diferencia en los módulos y en las fases de los coeficientes de reflexión de Fresnel para la polarización paralela y perpendicular, el estado de polarización de la onda reflejada generalmente cambia de lineal a elíptica. El conocimiento de esta elipse de polarización requiere la determinación de la relación entre

los coeficientes de Fresnel para ambas polarizaciones, que a su vez depende de la permitividad del material.

El modelo utilizado asume que los materiales medidos son homogéneos e isotrópicos y que la muestra se puede describir como una lámina de espesor finito para tener en cuenta las reflexiones que tienen lugar en su parte trasera. También es asumido que la antena transmisora emite ondas cuasi-planas y que el campo eléctrico asociado a la onda emitida por la antena llega con polarización lineal a la superficie de la muestra.

Debido al espesor finito de la muestra medida, la señal reflejada está compuesta de un gran número de ondas originadas en las múltiples reflexiones que se producen en el material. Por tanto, en este caso el coeficiente de reflexión se puede expresar de forma compacta a través de la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{1 - \exp(-2j\beta)}{1 - \rho_{12}^2 \exp(-2j\beta)} \rho_{12} \quad (1)$$

donde $\beta = k_0 d \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}$, siendo d el espesor de la muestra, ϵ_r la permitividad dieléctrica relativa del material, θ_i el ángulo de incidencia, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, siendo λ_0 la longitud de onda en el vacío a la frecuencia de trabajo, y ρ_{12} el coeficiente de reflexión en la intercara aire-material.

En la ecuación (1), se debe elegir $\rho_{12} = \rho_{\parallel}$ cuando se trabaja en polarización paralela al plano de incidencia y $\rho_{12} = \rho_{\perp}$ cuando se trabaja en polarización perpendicular, de forma tal que hay que utilizar en cada caso las siguientes ecuaciones de Fresnel:

$$\rho_{\parallel} = \frac{\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} - \epsilon_r \cos \theta_i}{\epsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (2)$$

$$\rho_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (3)$$

En la configuración utilizada para realizar las medidas, la señal reflejada es captada por una antena receptora para un valor fijo del ángulo de incidencia. La antena receptora gira alrededor de su eje y se registra la señal recibida para cada ángulo girado. De la relación entre la potencia máxima y la potencia mínima recibida puede determinarse la relación axial de la elipse de polarización y del ángulo en el que se obtiene la máxima potencia se puede determinar la orientación de la elipse, quedando finalmente determinado el estado de polarización de la señal reflejada.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Un esquema del montaje experimental utilizado se muestra en la Fig. 1.

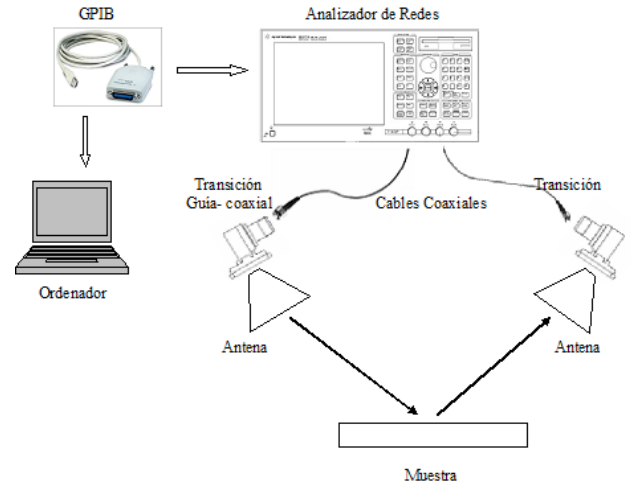


Fig. 1. Esquema del montaje experimental utilizado

Se utilizaron para emitir la onda incidente y recibir la onda reflejada dos antenas idénticas de bocina piramidal de dimensiones 14,4 x 10, 7 cm. que pueden trabajar en banda X. Las medidas fueron realizadas a la frecuencia de 9 GHz. Las antenas estaban situadas en una columna a 70 cm. del suelo y la distancia entre las antenas y la muestra era de 80 cm., para asegurar condiciones de campo lejano. La antena emisora trabaja en polarización lineal y se eligió su orientación de forma tal que el estado de polarización de la onda incidente fuera una mezcla de polarización paralela y perpendicular de amplitudes iguales. La antena receptora gira alrededor de su eje y se registra la señal recibida para diferentes ángulos (entre 0 y 180°). Las dos antenas están conectadas mediante transiciones guía-coaxial y los cables correspondientes a un analizador de redes vectorial HP-8720-C que es el utilizado para realizar las medidas. Los valores obtenidos pueden ser determinados a partir de los parámetros S medidos por el analizador de redes vectorial. Para evitar la influencia del entorno, las medidas se realizaron en el interior de una cámara semianecoica. Las medidas se realizaron para un ángulo de incidencia fijo de valor 45°. Se desecharon ángulos de incidencia mayores, con el fin de evitar la influencia de la señal directa entre las antenas.

Como ejemplo de los resultados obtenidos, en la fig. 2 y en la fig. 3 se muestra para los materiales S02 y M05 respectivamente, la señal recibida por la antena receptora para diferentes ángulos obtenido de forma experimental (puntos). Las líneas corresponden al cálculo teórico usando como valor de permitividad eléctrica 2.6 y 2.55, respectivamente.

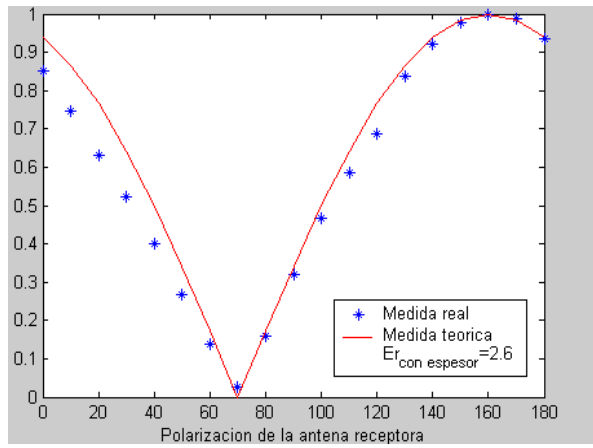


Fig. 2. Curvas elipsométricas: experimental (puntos) y teórica (línea continua) para la muestra S02. El eje vertical corresponde a la señal recibida normalizada

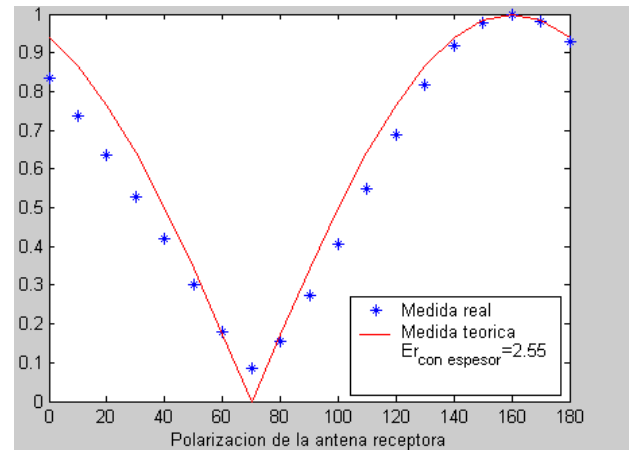


Fig. 3. Curvas elipsométricas: experimental (puntos) y teórica (línea continua) para la muestra M05. El eje vertical corresponde a la señal recibida normalizada

Material	Permitividad relativa ϵ_r					
	(a) Elipsometría 9 GHz	(b) Reflexión 8 – 10 GHz	(c) Transmisión 8 – 10 GHz	(d) Guía WR-284 2,5 – 4 GHz	(e) Guía WR-137 6 – 8 GHz	(f) Guía WR-90 8 – 12 GHz
Plásticos						
S01	-	3,3	1,5	-	1,04	-
S02	2,6	2,5	2,5	-	1,46	1,60
S03	3,0	2,7	2,8	-	1,30	1,17
S04	2,54	2,4	2,2	-	1,53	1,68
Maderas						
M05	2,55	2,8	2,7	1,88	1,83	1,67
M07	2,56	3,0	2,1	2,22	2,05	1,86
M08	3,3	2,5	1,8	1,78	1,82	1,83
M09	1	2,5	1,8	1,50	1,78	1,39
M10	1,5	1,9	2,0	1,13	1,88	1,26
M11	1,5	2,0	2,2	-	1,39	1,45

Tabla I. Valores de permitividad relativa obtenidos en este trabajo (a) mediante elipsometría y mediante otros métodos para un conjunto de materiales de construcción (explicación en el texto).

En la Tabla I se muestra los valores obtenidos para la permitividad eléctrica para un amplio conjunto de materiales. En la columna (a) se muestra los resultados obtenidos mediante el método de elipsometría utilizado en este trabajo. Con el fin de establecer una comparación, en la Tabla I se muestra los resultados obtenidos utilizando otros métodos. La columna (b) corresponde al método de Fresnel mediante medidas de reflexión en espacio libre correspondientes a la ref. [5]. La columna (c) corresponde al método de Fresnel mediante medidas de transmisión en espacio libre. En las columnas (d), (e) y (f) se muestra también los resultados obtenidos al medir los mismos materiales en otros rangos de frecuencia próximos utilizando otro método basado en la medida de la admitancia que presenta una guía rectangular al final de la cual se coloca la muestra de medida [6].

Creemos que las diferencias que se observan al comparar el método elipsométrico con los métodos de reflexión y transmisión son debidas a que el método que exponemos en este trabajo es más preciso por los dos siguientes motivos:

En primer lugar, en los métodos de reflexión y transmisión, es necesario realizar las medidas a diferentes ángulos de incidencia, de forma tal que para ángulos de incidencia grandes (mayores de 60°) las medidas no son tan

fiables debido a la influencia de la señal directa entre las dos antenas. En cambio, en el método elipsométrico se puede elegir un ángulo de incidencia fijo que evite el problema mencionado.

En segundo lugar, en los métodos de reflexión y transmisión es necesario realizar la medida absoluta de los coeficientes de reflexión y transmisión. Esto implica que, en el método de reflexión, es imprescindible utilizar un material de referencia con el que comparar las medidas. En este caso el material utilizado fue una lámina metálica la cual debía colocarse en una posición lo más parecida posible a la que se situaría posteriormente el material que hay que medir, con lo que este procedimiento puede originar pequeñas incertidumbres. En cambio en el método elipsométrico, los valores medidos son valores relativos de señal, con lo que desaparece la fuente de error inherente a la medida de valores absolutos. También es de destacar que en este último método, para obtener resultados fiables es únicamente necesario realizar medidas de amplitudes, ya que la información referente a las fases está incluida en el giro de la antena.

En cuanto a las diferencias que se observan en el material M09 entre los diferentes métodos, creemos que

pueden ser debidas a la presencia de una mayor rugosidad en la superficie de dicho material.

Las discrepancias que se observan al comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los obtenidos en la ref. [6] pueden ser debidos a que en este último caso los datos fueron deducidos utilizando un modelo teórico que no tiene en cuenta el espesor finito de las muestras.

Se debe destacar que el método que hemos utilizado permite en principio deducir no sólo la parte real de la permitividad relativa, sino también la tangente de pérdidas del material. Sin embargo, los datos experimentales pueden explicarse despreciando la parte imaginaria de la permitividad dieléctrica del material, cuyo valor es previsible que sea muy pequeño para el tipo de materiales que hemos medido.

IV. CONCLUSIONES

Hemos obtenido el valor de la permitividad relativa de un amplio conjunto de materiales de construcción tales como plásticos y maderas mediante el método elipsométrico consistente en determinar el estado de polarización de la señal reflejada a la frecuencia de 9 GHz y hemos comparado estos resultados con los obtenidos con otros métodos de reflexión y transmisión en espacio libre (métodos de Fresnel) y utilizando guías rectangulares. Tal como se explica en el apartado anterior, creemos que el método elipsométrico presentado en este trabajo es más preciso y ofrece mejores resultados que métodos utilizados anteriormente en otros trabajos. Los resultados obtenidos muestran la gran capacidad de este método como forma no destructiva para la caracterización electromagnética de los materiales en radiofrecuencia. Creemos que puede ser interesante utilizar este mismo método para otros ángulos de incidencia e incluso se puede implementar para trabajar en la configuración de transmisión.

REFERENCIAS

- [1] L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan and V. K. Varadan. "Microwave electronics: measurements and material characterisation" Ed. John Wiley and Sons 2004
- [2] F. Sagnard, F. Bentabet and C. Vignat "In situ measurements of the complex permittivity of materials using reflection ellipsometry in the microwave band: theory (part I)" IEEE Trans. Instrum. Meas. Vol. 54, nº 3 pp. 1266-1273 (2005)
- [3] F. Sagnard, F. Bentabet and C. Vignat "In situ measurements of the complex permittivity of materials using reflection ellipsometry in the microwave band: experiments (part II)" IEEE Trans. Instrum. Meas. Vol. 54, nº 3 pp. 1274-1282 (2005)
- [4] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara. "Ellipsometry and Polarized Light" Ed. North-Holland (1988)
- [5] J. M. Rodríguez, M. Blanco, L. López, V. González, C. Rueda, I. Gómez, J. E. González y J. L. Jiménez. "Medidas de propiedades dieléctricas de construcción utilizando técnicas de reflexión" XXIV Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. URSI 2009 Santander, 16-18 septiembre 2009.
- [6] J. M. Rodríguez, A. López, N. López, V. González, C. Rueda, I. Gómez y J. E. González. "Medidas de propiedades dieléctricas de construcción utilizando una guía rectangular" XXIII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio. URSI 2008 Madrid, 22-24 septiembre 2008.